

V Á L A S Z

Dr. habil. Jármai Károly, egyetemi tanár, a műszaki tudomány doktora
bírálata

Modális dekompozíció vékonyfalú rúdelemek stabilitásvizsgálatában

címmel az MTA doktora cím elnyerésére benyújtott értekezésemről

Mindenekelőtt köszönöm a bírálatot. A bírálatból kitűnik, hogy legjobb igyekezetem ellenére sem sikerült szerkesztési hibáktól és pontatlan fogalmazásoktól mentes dokumentációt összeállítani. A pontosításokat ezúton igyekszem megtenni, a Bíráló által megfogalmazott konkrét kérdések megválaszolásával.



Dr. Ádány Sándor

Budapest, 2018. október 26.

1. kérdés

2. oldal: Introduction „The work presented in this dissertation is essentially of theoretical nature, therefore, essentially independent of the application, and independent of the material of the member”. Kérem legyen szíves megmagyarázni ezt a kijelentést.

Válasz

Az idézett helyen azt kívántam hangsúlyozni, hogy bár a disszertációban bemutatott minden példa a szerkezet-építőmérnöki gyakorlatból jön és acél rúdelemekre vonatkozik, a bemutatott eljárások nem pusztán ilyen acél szelvényekre érvényesek és alkalmazhatóak, hanem egyéb mérnöki területek más anyagból készült szelvényeire is (pl. alumínium, műanyag), ilyen értelemben tehát függetlenek az alkalmazástól és anyagtól.

Megjegyzem még, hogy a disszertációban tárgyalt cFSM eljárás és a mód-identifikációs eljárás tulajdonképpen az elmozdulás-mező bázisfüggvényeinek manipulációja, ezért – bár a disszertációban csak lineáris stabilitásvizsgálatra vannak alkalmazva – ezen eljárások alkalmazhatóak volnának más vizsgálatokra (pl. lineáris vagy nemlineáris statikus vizsgálatok, dinamikai vizsgálatok) is. A disszertációban bemutatott eredmények nagyobb része tehát ilyen értelemben is általános.

Végül, megemlíteném, hogy a dolgozatban számos helyen a bemutatott példák kissé extrémek, azaz olyanok, amelyek a gyakorlatban nemigen fordulhatnak elő (pl. extrém rövid rudak rugalmas kihajlása, szokatlan keresztmetszetek, szokatlan anyagi jellemzők). Bár közvetlen, pl. egy tervező mérnök számára hasznos gyakorlati jelentősége az ilyen numerikus eredményeknek nincs, mégis hasznosak, mert jól mutatják a különféle megközelítések közötti

különbségeket, a tárgyalta eljárások sajátosságait, esetleg alkalmazási korlátait. Ilyen értelemben értelmezendő az az állítást, hogy a dolgozat „alapvetően elméleti jellegű”.

2. kérdés

12. oldal: 2.1.4 fejezet „ v is linear in x within a flat part”. Kérem legyen szíves ezt részletezni.

Válasz

A dolgozatban v a hosszirányú eltolódást jelöli. Az idézett feltétel tehát azt jelenti, hogy a hosszirányú eltolódások eloszlása lineáris egy sík lemezelemében. Az idézett meghatározás annyiban pontatlan, hogy a lineáris eloszlás nem a teljes lemezelemében értendő, hanem csak keresztirányban (hiszen hosszirányban az eloszlás az alkalmazott FSM szerint mindenképpen trigonometrikus). Az idézett feltétel azt sem említi, hogy a lemezelem középsíkjában értendő a v , bár ez az FSM logikája alapján talán egyértelmű.

3. kérdés

12. oldal: hirtelen feltűnik a G , D , L stabilitási csoport mellett az O (other). Ez mit takar? Mi a definíciója? (Később a 27. oldalon van megadva néhány részlet róla).

Válasz

A dolgozatban követtem a cFSM „fejlődéstörténet”-ét. A cFSM első változatában (melyről a 2. fejezet szól,) az O deformációs térrel keveset foglalkoztunk/foglalkoztam. Bár gyakorlati szempontból vizsgáltuk, hogyan volna érdemes meghatározni az O altér bázisfüggvényeit, de elméleti oldalról nem (vagy csak alig) vizsgáltuk a kérdést. Ennek elsődleges oka az, hogy az O altér önmagában nem érdekes a stabilitásvizsgálatok szempontjából, ha a keresztmetszeti alak nyitott.

Később felismertem, hogy a cFSM nem pusztán stabilitásvizsgálatokban alkalmazható (hanem pl. a 4. fejezetben bemutatott mód-identifikációra is, de egyéb alkalmazásokra is), másrészt ki akartam terjeszteni zárt szelvényekre, illetve tulajdonképpen tetszőleges keresztmetszetű elemekre, és ekkor már az O altérbe tartozó deformációkkal-elmozdulásokkal komolyabban kellett foglalkozni. Ezt hűen tükrözi a disszertáció is, amelynek 3. fejezete a cFSM általánosítását mutatja be. Ebben a 3. fejezetben az O tér már cízellátlan jelenik meg, főként az O térnek az ún. S nyírási altere igen részletesen van elemezve.

4. kérdés

25. oldal: Fig. 2.7 Az axial jelölés helyett a bending és torque mellett nem inkább compression/tension a megfelelőbb? A warping functions mennyire értelmezhető húzás/nyomás esetén?

Válasz

A cFSM kidolgozásakor viszonylag sokat gondolkodtunk, mit hogyan nevezzünk el. Az „axial” mód elnevezés alkalmasnak tűnt, de lehetne máshogy is nevezni, pl. „tension/compression”.

A „warping” függvény tiszta húzás/nyomás esetén is értelmezhető, ekkor a függvény konstans egy adott keresztmetszetben, míg hosszirányú eloszlása az FSM alakfüggvény szerint koszinuszos.

5. kérdés

A 2. fejezet a cFSM módszert mutatja be, ahogy eredetileg bevezetésre került. A definícióknál nem szerepel, milyen peremfeltételre, illetve milyen erőbevezetésre érvényes, alkalmazható a módszer?

Válasz

A cFSM egy (relatív specális) szemianalitikus FSM-verzió még speciálisabb változata. A cFSM tehát öröklí az eredeti FSM eljárás minden alapfeltételét, de azokat még kiegészíti. Az állapot jelentő FSM eljárás mechanikai szempontból egy nagyon specális feladatot old meg, de azt nagyon hatékonyan (azaz a felhasználótól minimális mennyiségű inputot igényel, az eredményeket érdemi várakozási idő nélkül szolgáltatja, és olyan formában, hogy az közvetlenül felhasználható szabványos méretezési eljárásban). Az adott FSM eljárás alapvető célja kritikus teherparaméterek meghatározása vékonyfalú rúdelemekre. Specialitása, hogy csak hosszirányú rúdvégi megoszló terhet feltételez, mindig azt feltételezve, hogy a rúd két végén ugyanolyan eloszlású, de ellentétes irányú terhelés hat (leggyakrabban a központos nyomásnak vagy tiszta hajlításnak megfelelő eloszlású megoszló terhet). Az adott FSM eljárás nem számol feszültségeket, hanem feltételezi, hogy a rúd hossza mentén minden keresztmetszetben a rúdvégi tehereloszlásnak megfelelő hosszirányú normálfeszültség működik. Ugyanezen okból a sávok geometriai merevségi mátrixának elemei előre megadhatóak igen egyszerű analitikus kifejezésekkel, hiszen csak egyfajta, nagyon egyszerű erőrendszer működhet a sávban. Szintén specialitás, hogy az eredeti FSM eljárásban nincsenek a felhasználó által definiált megtámasztások sem. A megtámasztásokat az interpolációs függvények alakjából lehet visszakövetkeztetni. A leggyakrabban alkalmazott egyszerű szinusz és koszinusz alakú hosszirányú függvények esetén implicit módon csuklós-csuklós támaszokat lehet megtámasztásnak gondolni, hiszen a feltételezett bázisfüggvények hosszirányú eloszlása leginkább a csuklós-csuklós megtámasztásnak felel meg. Az adott FSM számításának talán leghelyesebb értelmezése az, hogy amikor kiszámít egy kritikus teherértéket, az nem egy valódi rúdelemhez tartozik, hanem egy fiktív feladat megoldása, ahol ismert a keresztmetszet, ismert a rúdmentén állandó belső erőrendszer (mely csak hosszirányú fajlagos erőből áll), és ismert a stabilitásvesztéshez tartozó jellemző félhullámhossz (azaz „buckling length”).

Mindezek az információk a hivatkozott FSM publikációkból ugyan kiderülnek, de vélhetőleg jó lett volna ezeket a disszertációban is (legalább röviden) összefoglalni. Ez sajnos kimaradt, részben a terjedelmi korlát miatt.

6. kérdés

34. oldal: 3.1.2 fejezet Itt két peremfelételt sorol fel pined-pined, single-single, majd később többet is. Jó lett volna ábrán is bemutatni ezeket, pl. a clamped-guided hogy néz ki.

Válasz

A különböző megtámasztások elnevezéseit az irodalomból vettem át, de belátom, hogy érdemes lett volna elmagyarázni, vagy szemléltetni őket. Pl., a „clamped-guided” elnevezés olyan megtámasztást takar, amikor a rúdvégeken az elfordulások meg vannak gátolva, de a rúdvégek keresztirányban egymáshoz képest eltolódhatnak. A disszertációban a „simple” megtámasztás a „pinned” megtámasztás szinonimája. Ez szokásos a vonatkozó irodalmakban, de elfogadom, hogy ezt célszerű lett volna megemlíteni a disszertációban.

7. kérdés

35. oldal: 3.1.3. fejezet A q értéke az egyes peremfeltételeknél mennyi? A mátrix méretének növekedése csak megnehezíti a megoldás megtalálását, vagy el is veszi az értelmét? Felvetődik a kérdés, hogy a finomítások mennyivel teszik pontosabbá a számítást és milyen erőfeszítéssel járnak?

Válasz

Az ún. „simple-simple” megtámasztás esetén elegendő 1 tagot felvenni a trigonometrikus sorból, minden más megtámasztás esetén több tagra van szükség, ha valójában pontos megoldást akarunk. Általában az igaz, hogy minél több tagot veszünk figyelembe, annál pontosabb a megoldás. Konkrét számot q -ra nehéz mondani, de a tapasztalatok azt mutatják, hogy néhány tag már viszonylag jó megoldást ad a kisebb sajátértékekkel rendelkező megoldásokra. Magasabb sajátértékekhez tartozó megoldáshoz több tagra van szükség.

A több trigonometrikus tag figyelembe vétele elég kedvezőtlenül befolyásolja a megoldás hatékonyságát. Egyrészt a q -val arányosan nő a feladat (pl. merevségi mátrix) mérete, de a merevségi mátrix struktúrája is kedvezőtlenül változik (praktikusan: jelentősen meg tud nőni a sáv szélesség). Bevallom, a saját véleményem az, hogy ha valós rudakat különféle megtámasztási viszonyokkal akarunk számítani, akkor az FSM eljárás elveszíti a hatékonyságát, így némileg az értelmét is. A disszertációban a 3. fejezetben azért említettem meg a különböző végmegtámasztásokat, mert amikor a cFSM eljárás általánosítása történt, addigra már a CUFSM programot kiterjesztették a disszertációban is említett megtámasztásokra (amely munkában egyébként én lényegében nem vettem részt), így a kiterjesztett, tetszőleges keresztmetszetre alkalmazható cFSM kidolgozásánál és publikálásánál már figyelembe kellett venni, hogy a háttérrel jelentő FSM eljárásban az interpolációs függvények függvénytörzse alakjában is lehetnek.

8. kérdés

63. oldal: Fig. 3.2.9 nagyon jól mutatja a tönkremenetel változását a hossz függvényében. Tudná tovább osztani ezt az egyes G , D , L összetevőkre is?

Válasz

Igen. Ha a cFSM bázisvektorokat előállítottuk, akkor bármely FSM megoldás (azaz a megoldásként előálló elmozdulásvektor) kifejezhető a bázisvektorok lineáris kombinációjaként, hiszen a cFSM bázisvektorok végeredményben ugyanazt a deformációs teret feszítik ki, mint amelyet az FSM eredeti szabadságfokai és interpolációs függvényei. Ez viszont azt jelenti, hogy minden egyes bázisvektor hozzájárulása a vizsgált elmozdulásvektorhoz megállapítható, illetve automatikusan számítható a lineáris kombináció megoldásakor. Így pl. a (2.63) képlet első tagjának segítségével minden egyes bázisvektor részvétele számszerűsíthető. Tulajdonképpen az egyes módusok (mint pl. G , D , L) részvétele éppen az adott G , D , L alterekbe tartozó egyes bázisvektorok részvételeiből számítható, a (2.63) képlet második tagja szerint. (A 3. fejezetben tárgyalt, általánosított cFSM ebből a szempontból nem különbözik a 2. fejezetben tárgyalt első cFSM változattól, ezért a 3. fejezet nem is ismétli meg a 2.4.3. szakasz képleteit, fejtegetését.)

9. kérdés

73. oldal: Itt definiál dolgokat: két végén csuklós prizmatikus rúd, a keresztmetszeten egyenletesen megoszló nyomóerővel, anyag lineárisan rugalmas, nincs alakpontatlanság, maradó feszültség, anyag inhomogenitás. Egy ilyen jellegű definíció az értekezés elején lett volna jó!

Válasz

A disszertáció bevezetésében, a 2. oldalon tulajdonképpen szerepel egy hasonló definíció, ott nyilván nem pusztán a globális stabilitásvesztésre, (hiszen a dolgozat egészét tekintve nem csak globális stabilitásvesztésről szól,) hanem a lineáris stabilitásvizsgálatokra általában. Meglehet, hogy a disszertáció bizonyos helyein, pl. fejezetek elején, érdemes lett volna újra, esetleg részletesebben definiálni az adott probléma esetén érvényes alapfeltevéseket.

10. kérdés

96. oldal: Mat2 $E=210000\text{MPa}$, $G=2100\text{ MPa}$ miért ilyen kicsi? Mi ennek a haszna?

Válasz

Itt visszautalnék az 1. kérdésre adott válaszom végére. Bár a kérdésben említett nagyon kicsi nyírási rugalmassági modulusz klasszikus anyagoknál nemigen fordul elő, a szélsőséges anyagi jellemzők felnagyítják, így érthetőbbé teszik a bemutatni kívánt jelenséget, az adott esetben pl. a nyírási alakváltozások hatását.

Megemlítem még, hogy az idézett példában G értéke mintegy 2%-a a hasonló izotróp anyag G értékéhez képest. Ez valóban nagyon kicsi érték, de 10% alatti érték könnyen előfordulhat a való életben is, pl. szálerősítéssel anyagoknál, vagy akár acélnál is, ha megfelelő elrendezésben és mennyiségben lukakat helyezünk el a rúdban. Ez utóbbira példák az ún. „slotted” gerincű hidegen hajlított acél profilok, melyek ekvivalens nyírási merevsége olykor nem több, mint 7-8%-a az acél anyag nyírási merevségének.

11. kérdés

97. oldal: Nem látom mi a különbség a z 5.10 táblázat felső és alsó 3 sora között?

Válasz

Ez sajnos egy szerkesztési hiba. Az első 3 eredmény-sor „major-axis” körüli kihajlásra vonatkozik, (ahogy ezt a táblázat utolsó oszlopa helyesen jelzi,) míg a második 3 eredmény-sor „minor-axis” körüli kihajlásra vonatkozik. E második 3 eredmény-sor esetén a táblázat utolsó sora hibásan „major-axis”-t jelöl, ami tehát helyesen „minor-axis” volna.

A 3-soros blokkokban az egymás alatti számok nagyon hasonlóak, ez azt kívánja bizonyítani, hogy a háromféle módszer lényegében ugyanazt a numerikus eredményt adja, ha mindegyiknél ugyanazon feltevéseket követjük következetesen (az adott eredmények esetén pl. követjük az ún. yny opciót).

Angol elírások

33. oldal: general displacement filed helyett general displacement field

45. oldal: does not exist, neither. Kettős tagadás, felesleges.

Válasz

Természetesen egyetértek.

A tézisekre vonatkozó megjegyzés

Az első két tézis összevonását javaslom.

Válasz

Egyetértek azzal, hogy az első két tézis összetartozik abban az értelemben, hogy mind a kettő a cFSM módszer kidolgozásáról szól. Alapvetően szerkesztési kérdésnek gondolom, hogy egy vagy két tézisként vannak-e megfogalmazva az állítások. Annak oka, hogy én két tézisként való megfogalmazás mellett döntöttem az, hogy a két tézisben kijelentett eredmények időben viszonylag távol születtek, így a tézisek háttérét képező publikációk is jól elkülönülnek. De el tudom fogadni a Bíráló által javasolt tézismegfogalmazást is.